

# Climatología de los ciclones tropicales que tocaron tierra en Cuba entre 1980 y 2019

## Climatology of landfalling tropical cyclones in Cuba from 1980 to 2019



CU-ID: 2377/v27n4e06

 Patricia Coll-Hidalgo<sup>1</sup>,  Albenis Pérez-Alarcón<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Meteorología, Empresa Cubana de Navegación Aérea, La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, Environmental Physics Laboratory (EPhysLab), Campus As Lagoas s/n, Ourense, 32004, Spain

<sup>3</sup>Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba

**RESUMEN:** En la presente investigación se realiza un análisis climatológico de los eventos de “landfalling” de ciclones tropicales (CTs) en Cuba entre 1980 y 2019. Para desarrollar el estudio se utilizaron los registros históricos de los CTs de la base de datos HURDAT2 del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos. En el periodo de estudio el territorio cubano fue afectado por 27 eventos de “landfalling”, de los cuales 16 ocurrieron en la mitad occidental y 11 en la mitad oriental. Como promedio los CTs formados en el mar Caribe occidental tienen más probabilidad de tocar tierra en la región occidental, mientras que los originados entre el Arco de las Antillas menores y la costa de África Occidental tienden a cruzar la línea de costa en el oriente. En ambos casos, el impacto del CTs es común por la costa sur. El análisis anual reveló una tendencia al aumento (disminución) de la frecuencia de “landfalling” en la región oriental (occidental), aunque no tiene significancia estadística. Por otro lado, en el análisis mensual se encontró que el mes de octubre exhibe la mayor frecuencia. La densidad de probabilidad de viento máximo mostró que los CTs más intensos generalmente afectan las costas de la región oriental de Cuba. Como promedio, la costa cubana es frecuentemente afectada por tormentas tropicales y huracanes categoría 4 en la escala Saffir-Simpson. Finalmente, tanto la Oscilación Multidecadal del Atlántico como la Meridional modulan la frecuencia de “landfalling” en ambas regiones.

**Palabras clave:** Ciclones Tropicales, Landfalling, Climatología, Cuba.

**ABSTRACT:** In this research, we performed a climatology analysis of tropical cyclones (TCs) landfalling in Cuba between 1980 and 2019. To develop the study, the historical records of TCs from the HURDAT2 database of the National Hurricane Center of the United States were used. In the study period, the Cuban territory was affected by 27 landfalling events, of which 16 occurred in the western Cuba and 11 in the eastern Cuba. On average, TCs formed in the western Caribbean Sea are more likely to make landfall in western Cuba, while those originating between the Lesser Antilles Arc and the West African coast tend to cross the coastline in eastern Cuba. In both cases, the TC impact is common along the southern coast. The annual analysis revealed an increasing (decreasing) trend in the frequency of landfalling in the eastern (western) region, although it is not statistically significant. Moreover, in the monthly analysis, we found that October exhibits the highest frequency. The maximum wind speed probability density showed that the most intense TCs generally affect the coasts of the eastern region of Cuba. On average, the Cuban coast is frequently affected by tropical storms and category 4 hurricanes on the Saffir-Simpson scale. Finally, both the Atlantic Multidecadal Oscillation and the Atlantic Meridional Mode modulate the landfalling frequency in Cuba.

**Keywords:** Tropical Cyclones, Landfalling, Climatology, Cuba.

### INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales (CTs) son los fenómenos meteorológicos más propensos a ocasionar desastres debido al aumento de la población en regiones coste-

ras y al valor económico creciente de las infraestructuras. La temporada ciclónica de la cuenca del Atlántico Norte (NATL, por sus siglas en inglés) se extiende desde el 1<sup>o</sup> de junio hasta el 30 de noviembre.

\*Autor para correspondencia: Albenis Pérez Alarcón. E-mail. [apalarcon1991@gmail.com](mailto:apalarcon1991@gmail.com)

Recibido: 06/05/2021

Aceptado: 22/12/2021

A partir de la década de 1990, la intensidad y duración de los CTs muestran un incremento, lo cual puede estar directamente relacionado con la influencia antropogénica (Emanuel, 2005). El aumento de la temperatura superficial del mar (TSM) como consecuencia del calentamiento global es uno de los factores que ha modulado el mayor poder destructivo de los CTs en los últimos años (Webster & Chang, 2005; Foltz *et al.*, 2018). Algunos autores (McDonald *et al.*, 2005; Chauvin *et al.*, 2006; Oouchi *et al.*, 2006; Gualdi *et al.*, 2008; Knutson *et al.*, 2008) han observado una tendencia al aumento de la actividad ciclónica en NATL a partir del análisis de escenarios climáticos.

Las tendencias climáticas proyectadas y el comportamiento reciente de los CTs alertan a las comunidades expuestas a los fuertes vientos, los tornados asociados y las inundaciones ocasionadas por las intensas lluvias. En este sentido, los efectos negativos son más significativos cuando los CTs impactan directamente sobre la línea de costa, proceso denominado en inglés "landfalling" (a lo largo de todo el texto usaremos este término para referirnos a cuando el centro de un CT toca tierra). Las climatologías de "landfalling" en la cuenca del NATL han permitido relacionar la frecuencia de afectación y examinar el potencial de daño esperado. Por ejemplo, la climatología de eventos de "landfalling" ocurridos en el periodo 1951-2000 en México, arrojó que la Península de Yucatán y el estado norteño de Tamaulipas son los más expuestos durante la temporada de huracanes. Para este territorio se ha observado un incremento de la frecuencia de huracanes y ciclones tropicales que tocan tierra (Jáuregui, 2003). Para los Estados Unidos de América (EUA) se concluyó que la mayor cantidad de huracanes que penetraron por las costas sur y este, se formaron en el Golfo de México y el Mar Caribe, describiendo como promedio una trayectoria hacia el noroeste (Kossin *et al.*, 2010).

El enfoque de estos estudios ha sido orientado fundamentalmente a la descripción de la variabilidad interanual. En el caso de EUA y México, se ha sugerido que los eventos de "landfalling" de los CTs formados en la cuenca del NATL en el periodo 1950-1998 son modulados por la Oscilación del Ártico (AO, por sus siglas en inglés) y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Larson *et al.*, 2003). Por otro lado, la génesis de los CTs cerca la costa de África Occidental está modulada por la TSM, mientras que el Anticiclón subtropical del Atlántico Norte (NASH, por sus siglas en inglés) influye en la génesis en las inmediaciones del Arco de las Antillas Menores (Pérez-Alarcón *et al.*, 2021).

Otros autores (Colbert & Soden, 2012) han demostrado que condiciones de El Niño (fase positiva del ENOS) en el Océano Pacífico tropical están asociadas con un debilitamiento del NASH, un aumento en el porcentaje de CTs que recurvan sobre el océano y una disminución en el porcentaje de CTs que tocan tierra. Además, durante la fase positiva de la Oscilación del

Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), la costa este de EUA es más susceptible a los CTs que tocan tierra, mientras que durante la fase NAO negativa aumenta la probabilidad de "landfalling" en la costa de EUA bañada por el Golfo de México (Elsner, 2003). También se ha encontrado un aumento en la actividad de CTs y, una mayor probabilidad de que estos sistemas tropicales toquen tierra, durante la fase positiva de la oscilación meridional del Atlántico (AMM, por sus siglas en inglés) (Kossin *et al.*, 2010).

El archipiélago cubano, ubicado en la región del Caribe, es afectado cada año directa o indirectamente por CTs. El peligro de afectación ha motivado el desarrollo de estudios dirigidos a la descripción climatológica de los CTs que han afectado el territorio cubano y a la determinación de los periodos de retorno de los mismos para las diferentes regiones de la isla (González-Ramírez & Ramos-Guadalupe, 2019; Marcelo & Rodríguez, 2020). De esta forma se determinó que el 81.8% de los huracanes que afectaron el país entre el 2000 y 2016 fueron intensos (categorías 3, 4 y 5 de la escala Saffir-Simpson (Simpson & Saffir, 1974)) (Roura-Pérez *et al.*, 2018). Recientemente, Valderá *et al.* (2021) realizaron un análisis de la variabilidad de la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y Cuba durante el periodo 1851-2020. En este estudio se encontró un aumento de la ciclogénesis tropical en el trimestre más activo, con más del 75% de los casos. Asimismo, entre 2001 y 2020 Cuba fue afectada por 13 huracanes, de los cuales 10 (76.9%) fueron de gran intensidad.

En reciente investigación (Fernández-Álvarez *et al.*, 2020) se mostró que Cuba fue afectada por el 25 % de los CTs formados en la cuenca NATL entre 1980 y 2016. El 23.97 %, 4.11 % y 71.92 % se formaron durante las fases positiva, negativa y neutral de la AMM, respectivamente. Estos autores no encontraron diferencias significativas entre las fases del ENOS. La distribución espacial de la precipitación de los CTs, cuyos centros se localizan a menos de 500 km de las costas cubanas, favorece el aporte a los acumulados de lluvia durante los meses de la temporada ciclónica (junio-noviembre). Es notable como a finales de la temporada de huracanes en NATL, la contribución de los CTs a los acumulados de lluvia mensual en Cuba oscila entre 10 y 50 % (Fernández-Álvarez *et al.*, 2020).

En estudios anteriores (Ballester *et al.* 1995, 2000, 2010; Alpizar-Tirzo *et al.* 2019; Fernández-Álvarez *et al.*, 2020; González-Ramírez & Ramos-Guadalupe, 2019; Marcelo & Rodríguez, 2020; Marcelo-García & Roura-Pérez, 2020) relacionados con el impacto de los CTs al territorio cubano no se encontró un análisis climatológico de la frecuencia de "landfalling". Por lo tanto, la distribución anual y mensual de los mismos ha sido poco estudiada. En la presente investigación, se desarrollará un análisis climatológico de los eventos de "landfalling" en la línea de costa de Cuba. Además

de regionalizar la frecuencia de ocurrencia, identificar las áreas de génesis, las trayectorias e intensidad de los CTs, se investigará brevemente la relación de la frecuencia de “landfalling” en Cuba con los modos de variabilidad climática ENOS, NAO, AMM y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), debido al papel modulador de los índices climáticos en la actividad ciclónica en la cuenca NATL.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Datos

La información de los CTs fue extraída de la base de datos HURDAT2 (Atlantic hurricane database) (Landsea & Franklin, 2013) del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos (NHC, por sus siglas en inglés). Este registro histórico de la actividad ciclónica contiene la información cada 6 horas de la posición, la intensidad, el tamaño de la tormenta y los eventos de “landfalling” de todos los ciclones tropicales y subtropicales formados en la cuenca del NATL. Varios autores (Landsea *et al.*, 2006; Vecchi & Knutson, 2011; Kossin *et al.*, 2013; Bhatia *et al.*, 2019) han planteado que los registros históricos de la actividad ciclónica pueden tener tendencias inciertas antes del inicio de la era de los satélites meteorológicos a mediados de la década de 1970, debido a la incertidumbre de los métodos de observación. Por lo tanto, se ha enfocado el presente estudio en el periodo 1980-2019, donde los registros de los CTs tienen calidad para análisis climáticos (Bhatia *et al.*, 2019).

Además, para obtener una visión completa de la frecuencia de los eventos de “landfalling” de CTs en el territorio cubano, en esta investigación se emplearon los promedios mensuales de junio a noviembre de la presión atmosférica media a nivel del mar (MSLP, por sus siglas en inglés), obtenidos de los campos de reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental-Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP-NCAR, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, con una resolución horizontal de 2.5° de latitud por 2.5° de longitud (Kalnay *et al.*, 1996).

Los índices de los modos de variabilidad climática utilizados en esta investigación se extrajeron del Laboratorio de Ciencias Físicas (PSL, por sus siglas en inglés), perteneciente a la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. La NAO consiste en un dipolo norte-sur de anomalías de MSLP, con un centro ubicado sobre Groenlandia y el otro centro de signo opuesto cubre las latitudes centrales de océano NATL entre 35°N y 40°N. El índice NAO se define como la diferencia de presión normalizada entre las Azores e Islandia (Hurrell, 1995; Jones *et al.*, 1997). Por su parte, la AMO se calcula como la TSM promedio ponderada por el área sobre el NATL, básicamente entre

0 y 70°N (Enfield *et al.*, 2001). Por otro lado, la AMM se calcula aplicando el Análisis de Covarianza Máxima a la TSM y a las componentes zonal y meridional del campo de viento a 10 m (Chiang & Vimont, 2004). De igual forma, el índice ENOS bivariado (Smith & Sardeshmukh, 2000) se utilizó para representar las condiciones ENOS combinando el tradicional Niño 3.4 TSM y el Índice de la Oscilación del Sur.

### Metodología

En este estudio se siguió una metodología similar a la empleada en investigaciones previas (Pérez-Alarcón *et al.*, 2021). Primero se determinaron todos los CTs que hicieron “landfalling” en algún punto de la costa del archipiélago cubano durante el periodo de estudio. Posteriormente, se separaron objetivamente los eventos de “landfalling” identificados en clústers aplicando la técnica *K-means* (MacQueen, 1967; Elsner, 2003), para caracterizar las regiones donde frecuentemente los CTs hacen “landfalling” en Cuba. El método de *K-means* es un método de partición sencillo y ampliamente utilizado que busca asignar cada punto a uno de los *K* grupos de manera que se minimice la varianza total entre los grupos.

Por otro lado, para determinar el centro del NASH en la región comprendida entre los 15°N-60°N y los 60°W-0°, se utilizó la técnica del vecino más cercano (Murray & Simmonds, 1991), que compara cada punto de rejilla con los que lo rodean para encontrar el punto que tiene mayor valor de presión que sus vecinos. Cada punto de malla se comparó con sus 24 puntos vecinos. Este algoritmo ha sido previamente aplicado para determinar el centro de circulación de anticiclones subtropicales (Reboita *et al.*, 2019; Pérez-Alarcón *et al.*, 2021)

Además, se determinó la densidad de probabilidad de las trayectorias de los CTs que frecuentemente tocan tierra en territorio cubano y la intensidad con la que lo hacen, a partir de la función de densidad de probabilidad (Rosenblatt, 1956; Parzen, 1962), la cual se define como:

$$\hat{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x_i, t) \quad (1)$$

donde *n* es el número de observaciones, *x<sub>i</sub>* representa el conjunto de puntos, *K<sub>x,t</sub>* es no negativo y está acotado para todo *x* y *t*  $0 \leq K_{x,t} < \infty$ . Además, para todo *x* real:

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x, t) dt = 1 \quad (2)$$

lo que asegura la normalización requerida para la estimación de la densidad del kernel (KDE, por sus siglas en inglés). En las aplicaciones prácticas más comunes, la KDE utiliza una función del núcleo simétrica, definida como:

$$K_{sym}(x, t) = \frac{1}{n} K\left(\frac{x-t}{n}\right) \quad (3)$$

donde  $h$  es el parámetro de suavizado. En este estudio empleamos el kernel simétrico de Gauss (ecuación 4), el cual es ampliamente utilizado (Wahiduzzaman & Yeasmin, 2020).

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

Finalmente, se calculó el número de eventos de “landfalling” en cada clúster para cada fase (positiva y negativa) de los modos de variabilidad climática empleados. Para determinar la significancia estadística de la correlación de Pearson se aplicó la prueba t-test (Kim, 2015), considerando dos grados de libertad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el periodo de estudio se formaron en la cuenca NATL 614 ciclones tropicales y se registraron 432 eventos de “landfalling”, de los cuales 27 (6 %) ocurrieron en algún punto del archipiélago cubano. En la temporada ciclónica del 2008 se registró el mayor número de “landfalling” en Cuba con seis casos. Entre ellos destaca el huracán Gustav (AL072008) que como huracán categoría 4 en la escala Saffir-Simpson, primero cruzó la línea de costa de la Isla de la Juventud el 30 de agosto de 2008 a las 1800 UTC, y seguidamente, a las 2200 UTC del mismo día, impactó la costa sur de Pinar del Río. Por su parte, el huracán Ike (AL092008), cruzó sobre la costa norte de Holguín el 8 de septiembre de 2008 a las 0200 UTC, como un huracán categoría 4 (vientos máximos de 212 km/h), y posteriormente volvió a tocar tierra en la costa sur de Pinar del Río el 9 de septiembre a las 1400 UTC como un huracán categoría 1.

De forma general, durante el período de estudio la línea de costa del territorio cubano fue impactada en una ocasión por una depresión tropical, diez veces por tormentas tropicales, en cuatro ocasiones por huracanes categoría 1 y dos veces por huracanes categoría 2 y 3. Los huracanes categoría 4 cruzaron sobre la costa cubana en siete ocasiones mientras que sólo un huracán categoría 5 (Irma 2017) ha tocado tierra en el archipiélago cubano, como se muestra en la [Tabla 1](#).

### *Análisis de clúster de los eventos de “landfalling” en el territorio cubano*

La aplicación de la técnica de análisis de clúster revela dos regiones predominantes sobre el archipiélago cubano donde los CTs frecuentemente tocan tierra, como se muestra en la [Figura 1a](#). La primera región está localizada en la mitad occidental de Cuba rojo) con el 59.2 % de la frecuencia de eventos de “landfalling” mientras que la mitad oriental ( $L 2$ , azul) exhibe el 40.8 %. A partir de aquí se hace referencia

indistintamente a  $L 1$  y  $L 2$  como región occidental y región oriental, respectivamente. En ambas regiones la mayor frecuencia se observa en el mes de octubre, coincidiendo con el período de mayor probabilidad de afectación de CTs a Cuba, debido a la presencia de trenes de ondas tropicales en el mar Caribe que encuentran condiciones favorables para su desarrollo ciclónico tropical (Marcelo-García & Roura-Pérez, 2020). Sin embargo, en la [Figura 1b](#) son notables máximos secundarios en agosto ( $L 1$ ) y septiembre ( $L 2$ ).

Se observan además puntos de coincidencia entre ambas regiones: en  $L 1$ , los CTs tocaron tierra por la costa sur, mientras que en  $L 2$  solo tres CTs (Noel(2007), Ike(2008) e Irma(2017)) cruzaron sobre la costa norte. Estos resultados muestran la vulnerabilidad del territorio cubano a los CTs que se desplazan por los mares al sur del mismo. Por otro lado, no se observa “landfalling” en la región oriental en el mes de junio, lo cual está directamente relacionado con la mayor frecuencia de génesis a inicios de la temporada ciclónica en el Golfo de México.

En la variación anual ([Figura 2](#)), se observó una tendencia a la disminución de los eventos de “landfalling” en  $L 1$  y un aumento en  $L 2$ , aunque en ambos casos, la tendencia observada no es estadísticamente significativa. Como se muestra en la [Figura 2](#), existen diferencias interesantes en las estadísticas, al comparar la distribución anual de los “landfalling” en ambas regiones. La mayor frecuencia en  $L 1$  se observa entre 1995 y el 2008, mientras que  $L 2$  la exhibe entre 2005 y 2017. En la última década han sido más frecuentes los “landfalling” en la región oriental de Cuba, lo cual puede estar vinculado al ligero corrimiento hacia el este de las regiones de génesis (Murakami & Wang, 2010).

Los eventos de “landfalling” dependen de las trayectorias de los CTs, las que a su vez están determinadas por el flujo de dirección a gran escala y las interacciones entre el flujo de dirección y la dinámica de la tormenta. Varias características climáticas pueden influir en el flujo de dirección a gran escala. Lo más notable es el NASH, cuya fuerza y ubicación están influenciadas por una combinación de factores locales y remotos (Chen *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2011).

La [Figura 3](#) muestra la posición media del NASH y la densidad de probabilidad de las trayectorias de los CTs que han tocado tierra en el territorio cubano. Como se observa, no hay variaciones significativas en la posición y la intensidad del NASH, sin embargo, como era de esperar, son notables algunas diferencias en la estructura del sistema de altas presiones subtropicales.

Cuando la dorsal anticiclónica es más profunda y penetra con mayor intensidad hasta la Península de la Florida conduce a que los CTs se desplacen hacia el Golfo de México a través del mar Caribe. Este comportamiento aumenta la probabilidad de “landfalling” en la región occidental de Cuba ( $L 1$ ). Una dorsal an-

**Tabla 1.** Características de los ciclones tropicales que han tocado tierra en las costas del territorio cubano. Se incluyen la fecha, posición e intensidad de cada CT en el momento de tocar tierra. V\_máx y P\_mín representan la velocidad del viento (km/h) y la presión mínima central (hPa), respectivamente. Cat hace referencia a la categoría en la escala Saffir-Simpson. DT: Depresión Tropical, TT: Tormenta Tropical, HN (N=1,2,3,4,5): categorías de huracán.

Nombre	Código	Fecha	Hora (UTC)	Latitud	Longitud	V_máx	P_mín	Cat
Fabián	AL091991	19911015	2100	21.5	-82.8	74	1004	TT
Fabián	AL091991	19911016	0000	22.4	-81.8	74	1004	TT
Gordon	AL121994	19941113	1300	20	-74.9	74	1000	TT
Lili	AL121996	19961018	9300	22.3	-82	138	975	H1
Georges	AL071998	19980923	2130	20.1	-74.5	120	993	H1
Irene	AL131999	19991014	1900	22.7	-82.5	111	986	TT
Michelle	AL152001	20011104	2300	22.1	-81.2	212	950	H4
Isidore	AL102002	20020920	2100	22	-84.1	138	975	H1
Lili	AL132002	20021001	1400	22.1	-84	166	971	H2
Unamed	AL142002	20021016	1600	22.1	-80.7	46	1006	DT
Charley	AL032004	20040813	0430	22.7	-82.6	194	966	H3
Arlene	AL012005	20050610	0800	21.8	-84.5	83	1000	TT
Dennis	AL042005	20050708	0245	19.9	-77.6	222	956	H4
Dennis	AL042005	20050708	1845	22.1	-80.7	222	941	H4
Ernesto	AL062006	20060828	1115	19.9	-75.5	65	1005	TT
Noel	AL162007	20071030	0600	21.1	-75.8	93	997	TT
Fay	AL062008	20080818	0700	22.1	-80.8	83	1003	TT
Gustav	AL072008	20080830	1800	21.6	-82.5	231	943	H4
Gustav	AL072008	20080830	2200	22.4	-83.1	231	941	H4
Ike	AL092008	20080908	0200	21.1	-75.7	212	945	H4
Ike	AL092008	20080909	1400	22.6	-82.9	130	965	H1
Paloma	AL172007	20081109	0100	20.7	-78	157	970	H2
Isaac	AL092012	20120825	1500	20.1	-74.5	93	997	TT
Sandy	AL182012	20121025	0525	20	-76	185	954	H3
Matthew	AL142016	20161005	0000	20.1	-74.3	212	949	H4
Irma	AL112017	20170909	0300	22.3	-77.9	268	924	H5
Philippe	AL182017	20171028	2200	22.2	-81.6	65	1000	TT

ticiclónica más débil, pero elongada hasta la costa este de los Estados Unidos y la Península de la Florida, modula un desplazamiento de las trayectorias de los TCs más al este, hacia la región oriental del territorio cubano ( $L 2$ ), aumentando la probabilidad de que el centro de circulación del CT cruce sobre la línea de la costa cubana. Estos resultados son similares a los encontrados por otros autores, quienes demostraron que cuando el centro del NASH está desplazado hacia el norte se favorece la probabilidad de “landfalling” en el Archipiélago de las Bahamas y la región oriental de Cuba ( $L 2$ ), mientras que el centro del NASH sobre latitudes bajas favorece el movimiento de los CTs hacia el Mar Caribe, aumentando la probabilidad de un evento de “landfalling” en Centro América y la región occidental de Cuba ( $L 2$ ) (Pérez-Alarcón *et al.*, 2021).

Otro importante aspecto, apreciable en la Figura 3, son las regiones de génesis de los CTs que frecuentemente tocan tierra en cada clúster. Los CTs formados en el mar Caribe occidental tienen mayor probabilidad de tocar tierra en  $L 1$ . Investigaciones anteriores

(Marcelo *et al.*, 2019) han demostrado que el 32.6 % de los CTs que surgen en el mar Caribe occidental, o se forman al este del arco de las Antillas Menores y penetran en el Caribe, afectan las provincias habaneras, las cuales están comprendidas en la región  $L 1$ . Por su parte, los CTs formados entre el Arco de las Antillas Menores y la costa de África Occidental presentan mayor probabilidad de hacer “landfalling” en la región  $L 2$ . Estos resultados son reafirmados a partir de la Figura 4, donde se muestran las trayectorias de los CTs que han tocado tierra en las costas cubanas.

De forma general, la variación regional en la trayectoria de los CTs que tocan tierra podría estar relacionada con su longitud de formación. Los sistemas que se desarrollan más al oeste (este) tienen más probabilidades de tocar tierra en  $L 1$  ( $L 2$ ). Los patrones de actividad de CTs en el Caribe durante el siglo XX soportan esta afirmación (Elsner *et al.*, 2000). Por otro lado, en la región  $L 1$  la frecuencia de “landfalling” es 0.4 por año, mientras que en  $L 2$  esta relación es de sólo 0.25 por año, lo que reafirma que la región occidental de Cuba tiene más probabilidades (3.7 %)

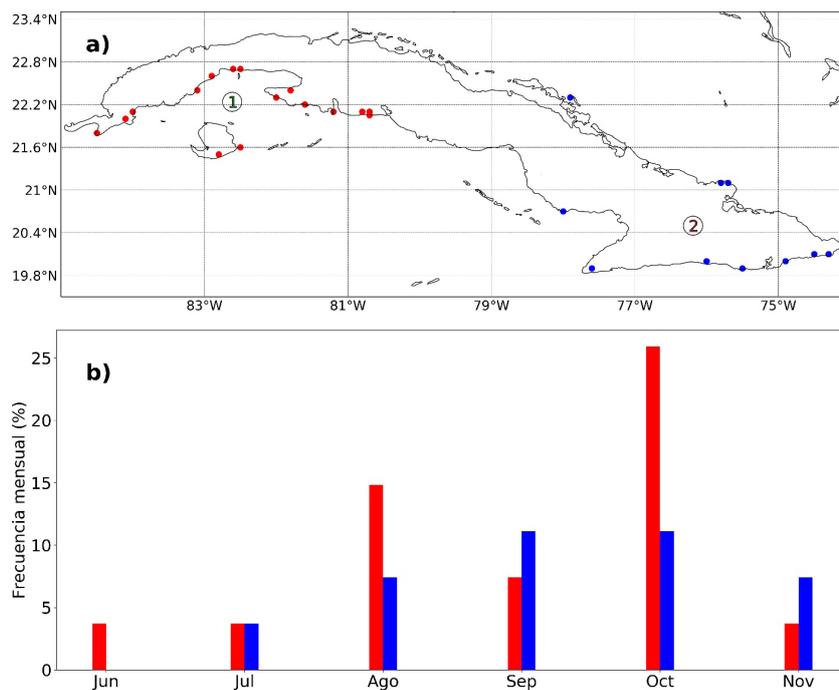


Figura 1. a). Representación espacial de las regiones donde los CTs tocan las líneas de costa cubanas y b) la proporción mensual de eventos de “landfalling” sobre Cuba.

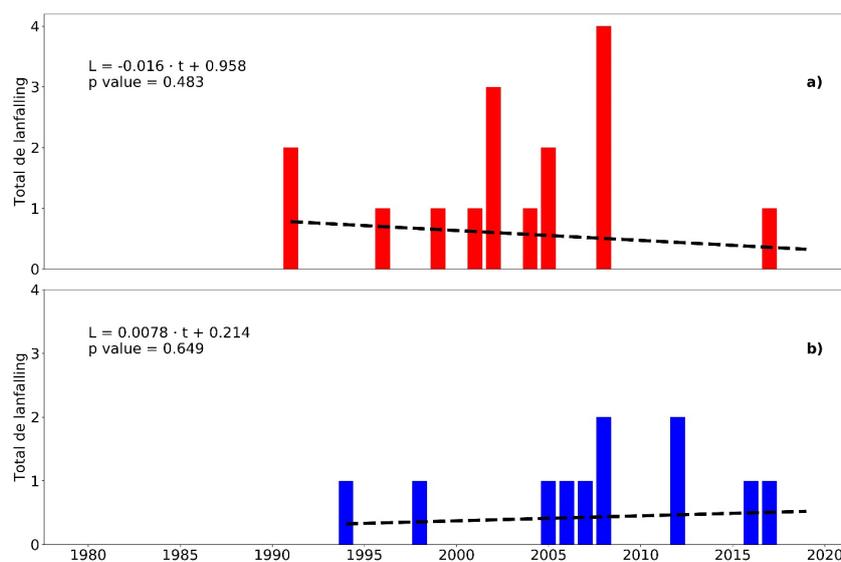


Figura 2. Variación anual de la frecuencia de eventos de “landfalling” de CTs sobre el territorio cubano a) L 1 b) L 2 . Las líneas discontinuas de color negro representan las líneas de tendencia,  $t$  representa la cantidad de años transcurridos desde 1980.

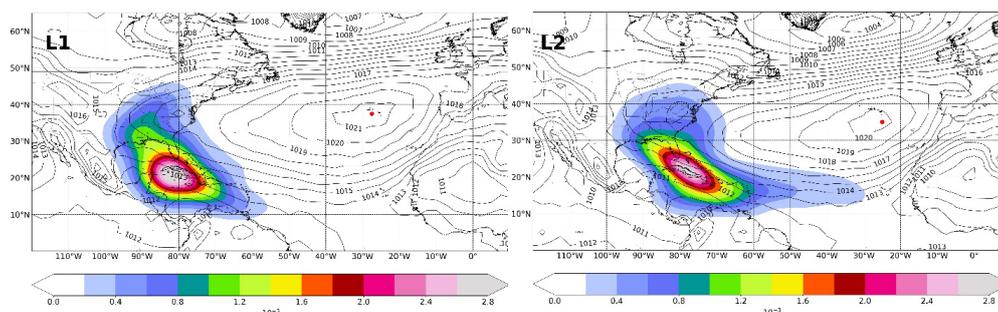
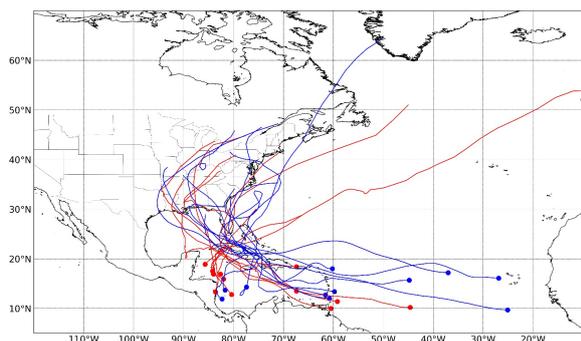
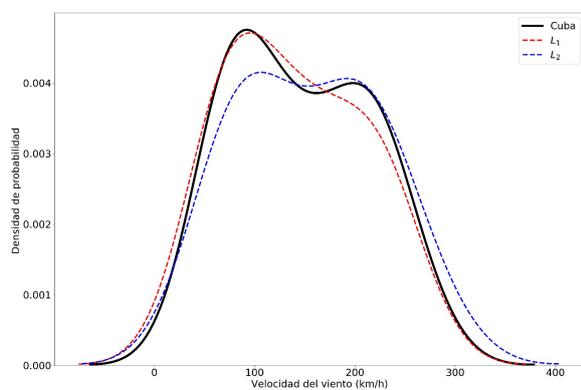


Figura 3. Densidad de probabilidad de las trayectorias de los CTs que han tocado tierra en el territorio cubano para cada clúster.



**Figura 4.** Trayectorias de los CTs que han tocado tierra en las regiones L<sub>1</sub> (rojo) y L<sub>2</sub> (azul) durante el período 1980-2019. Los puntos representan la posición de la génesis. Los puntos de génesis fueron considerados como el primer reporte de cada CT en la base datos HURDAT2.



**Figura 5.** Densidad de probabilidad de la intensidad de los CTs al tocar tierra en el territorio cubano.

de ser impactada directamente por el centro de circulación de un CT que la región oriental (2.5 %).

### Distribución de la intensidad de los CTs al tocar tierra en Cuba

El viento es uno de los principales peligros asociados con los CTs y puede causar daños sustanciales a las viviendas, la infraestructura y los ecosistemas, principalmente en regiones costeras. Además, el viento correlaciona significativamente con la severidad de otros peligros inducidos por los CTs, como marejadas ciclónicas, olas y precipitaciones intensas (Bloemendaal *et al.*, 2019; Phadke *et al.*, 2003).

Como muestra la Figura 5, la densidad de probabilidad de la intensidad de los CTs al tocar tierra en el territorio cubano exhibe una distribución bimodal, con la intensidad más probable oscilando entre los 65 y 105 km/h, y un máximo secundario oscilando entre los 180 y 200 km/h. En la región occidental L<sub>1</sub>, los CTs tienen mayor probabilidad de tocar tierra como tormentas tropicales, mientras que en la región oriental la distribución es ligeramente bimodal, con un amplio espectro de intensidades desde tormenta tropical hasta huracán categoría 3. Como comportamiento

medio, los CTs que tocan tierra en L<sub>2</sub> son más intensos que aquellos que lo hacen en L<sub>1</sub>.

También fueron analizados los cambios de intensidad en las 6 y 12 horas previas a tocar tierra. El 26.7 % de los CTs que tocaron tierra en L<sub>1</sub> experimentaron un proceso de intensificación en las 6 horas anteriores, mientras que el 46.7 % se intensificó a partir de las 12 horas previas al “landfalling”. Este resultado demuestra el papel modulador de la TSM en la intensificación de los CTs en su tránsito sobre las cálidas aguas del mar Caribe occidental (Wang *et al.*, 2017). En L<sub>2</sub>, los cambios de intensidad de los CTs 6 y 12 horas antes del “landfalling” fueron 16.7 % y 61.7 %, respectivamente. La baja frecuencia de intensificación 6 horas antes de tocar tierra en L<sub>2</sub> es consistente con la climatología del mar Caribe oriental, caracterizado por divergencia y subsidencia en la tropósfera baja (Shieh & Colucci, 2010), en asociación con el chorro de bajo nivel del Caribe (Wang, 2007). En promedio, los huracanes más fuertes (categoría 3 a 5 en la escala Saffir-Simpson) se fortalecen en un 60 % y 80 % de las ocasiones en las 12 horas previas al “landfalling” en L<sub>1</sub> y L<sub>2</sub>, respectivamente.

### Modos de variabilidad climática y los eventos de “landfalling” en el territorio cubano

También se identificaron y cuantificaron las diferencias dentro cada clúster en las relaciones entre la frecuencia de “landfalling” y los modos de variabilidad climática. Es bastante conocido que los eventos de El Niño están asociados con una disminución en la actividad de los CTs en la cuenca del NATL (Chu, 2004), mientras que un patrón inverso se observa durante La Niña. La distribución de los “landfalling” en la región occidental de Cuba (L<sub>1</sub>) está más fuertemente modulada por las fases positivas del ENOS, la AMO y la AMM, mientras que la fase negativa del ENOS y la NAO favorecen los “landfalling” en L<sub>2</sub>, como se muestra en la Figura 6. Investigaciones previas han demostrado que la fase negativa del índice NAO conduce a un aumento en la frecuencia de “landfalling” en las costas este y sureste de los Estados Unidos (Xie *et al.*, 2005). De igual forma, favorece la afectación directa e indirecta de huracanes sobre Cuba (Alpizar-Tirzo *et al.*, 2019). Similar a L<sub>1</sub>, la fase positiva de la AMO y la AMM favorecen el impacto del centro de circulación de los CTs sobre la línea de las costas de la región oriental de Cuba.

El análisis del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) revela una relación inversa ( $r=0.38$ ) estadísticamente significativa al 95 % ( $p<0.05$ ) entre los eventos de “landfalling” y la NAO en L<sub>2</sub>. Igualmente, el índice AMO correlaciona ( $r=0.42$ ) significativamente al 99 % ( $p<0.01$ ) con la frecuencia de CTs que cruzan la línea de costa de la región oriental, mientras que el índice AMM correlaciona ( $r=0.32, p<0.05$ ) con los “landfalling” en L<sub>1</sub>. En el resto de los casos, las correlaciones obtenidas no tienen significancia estadística.

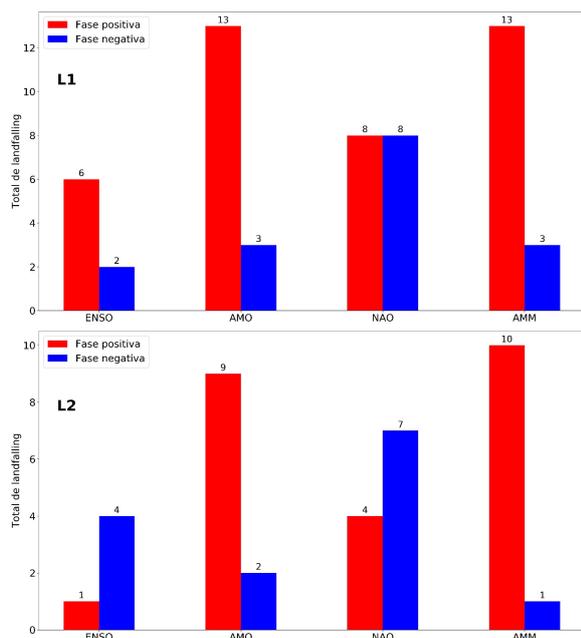
## CONCLUSIONES

En este estudio se realizó un análisis climatológico de los “landfalling” de CTs en el territorio cubano en el periodo 1980-2019. El análisis estadístico reveló que Cuba fue impactada directamente con mayor frecuencia por tormentas tropicales (10) y huracanes categoría 4 (7) en la escala Saffir-Simpson, mientras que sólo un huracán categoría 5 (Irma 2017) ha cruzado sobre tierra cubana. La temporada ciclónica más activa en la frecuencia de “landfalling” en Cuba fue la del 2008 con 6 casos, en la cual dos huracanes intensos (Gustav e Ike) impactaron dos veces la costa cubana. Se determinaron dos regiones sobre el archipiélago cubano donde frecuentemente el centro de circulación de los CTs impacta la línea de costa: la mitad occidental ( $L_1$ ) y la mitad oriental ( $L_2$ ). En ambos clústers los “landfalling” ocurren frecuentemente en la costa sur. Además, el mes de octubre fue identificado como el más peligroso en ambas regiones. Como promedio, los CTs que se forman en el mar Caribe occidental tienen mayor probabilidad de impactar la costa sur de  $L_1$  y los formados entre el Arco de las Antillas Menores y la costa de África Occidental tocan tierra con mayor frecuencia en  $L_2$ . Al tocar tierra, los CTs que afectan la región  $L_2$  muestran una distribución bimodal de densidad de probabilidad del viento máximo, oscilando entre los 100 km/h y 200 km/h, mientras que en  $L_1$ , la velocidad máxima más probable coincide con el rango de intensidades de tormenta tropical.

Finalmente, las fases positivas de la AMO y la AMM favorecen el impacto del centro de circulación de los CTs sobre la línea de costa cubana, exhibiendo correlaciones de Pearson estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), mientras que la fase negativa de la NAO modula la frecuencia de “landfalling” en  $L_1$ . Sin embargo, los lectores deben interpretar estas estadísticas con precaución, ya que la frecuencia de eventos de “landfalling” es baja en ambas regiones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos la disponibilidad de la base de datos HURDAT2 y al Laboratorio de Ciencias Físicas de la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de Estados Unidos por el acceso gratuito a los índices climáticos. Además, los autores agradecen al Centro Nacional de Predicción Ambiental - Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Estados Unidos por los datos de reanálisis empelados en esta investigación. Finalmente, los autores agradecen a Nathalí Valderá Figueredo y a un revisor anónimo por sus valiosos comentarios para mejorar el manuscrito.



**Figura 6.** Total de eventos de “landfalling” de ciclones tropicales en cada clúster durante las fases positivas y negativas del ENOS, la AMO, la NAO y el AMM. Sobre las barras se muestra el total de eventos de “landfalling” en cada modo de variabilidad climática.

Se ha demostrado en estudios previos (Wang *et al*, 2008; Klotzbach, 2011) que la AMO tiene un impacto significativo en la actividad de los CTs de la cuenca atlántica a través de alteraciones en la TSM en la cuenca tropical del Atlántico y el Caribe. La fase positiva de la AMO se asocia con temporadas ciclónicas más activas (Klotzbach & Gray, 2004), lo cual soporta las relaciones obtenidas en esta investigación entre la AMO y la frecuencia de “landfalling” en ambas regiones de Cuba. Sin embargo, se deben interpretar estas estadísticas con precaución, ya que en cada región la frecuencia de “landfalling” es baja (inferior a 0.4 por año).

Un par de puntos importantes a tener en cuenta son que, normalmente, se requieren las condiciones de La Niña en el Pacífico tropical para obtener una temporada activa en la cuenca atlántica cuando la AMO está en su fase negativa; mientras que, incluso, un evento de El Niño moderado, puede conducir a una temporada ciclónica activa cuando el AMO está en su fase positiva (Klotzbach & Gray, 2004). En contraste, no fue encontrada una correlación estadísticamente significativa entre la actividad ciclónica en la cuenca atlántica y la frecuencia de “landfalling” en ambas regiones del territorio cubano, lo cual demuestra que una temporada activa no significa un aumento de las afectaciones directas por CTs en el territorio cubano. Por lo anterior, deben realizarse estudios más profundos sobre la relación de la actividad ciclónica en la cuenca del NATL y la probabilidad de “landfalling” en la línea de costa cubana.

## REFERENCIAS

- Alpizar-Tirzo, M.; Perez-Suárez, R. & Roura-Pérez, P. 2019. "Variations in oceanic and atmospheric circulations. Its influence on the formation of hurricanes in the North Atlantic". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1): 46-67, ISSN: 2664-0880.
- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 1995. Variabilidad de la ciclogénesis tropical en el Atlántico de Norte, Informe Final del Proyecto 415.511, La Habana: Instituto de Meteorología de Cuba.
- Ballester, M.; González, C. & Pérez, R. 2000. Modelo de predicción de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte, Informe Científico del Resultado No. 5 del Proyecto 01301094, La Habana: Instituto de Meteorología de Cuba.
- Ballester, M.; Pedroso, C. G. & Pérez, S. R. 2010. Variabilidad de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte y su pronóstico: Proyecto 0803. La Habana: Editorial Academia, pp 170.
- Bhatia, K. T.; Vecchi, G. A.; Knutson, T. R.; Murakami, H.; Kossin, J.; Dixon, K. W. & Whitlock, C. E. 2019. "Recent increases in tropical cyclone intensification rates". *Nature Communications*, 10(1): 635, ISSN: 2041-1723, DOI: [10.1038/s41467-019-08471-z](https://doi.org/10.1038/s41467-019-08471-z)
- Bloemendaal, N.; Muis, S.; Haarsma, R. J.; Verlaan, M.; Apecechea, M. I.; Moel, H.; Ward, P. & Aerts, J.C.J.H. 2019. "Global modeling of tropical cyclone storm surges using high-resolution forecasts". *Climate Dynamics*, 52(7): 5031-5044. ISSN: 1432-0894, DOI: [10.1007/s00382-018-4430-x](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4430-x)
- Chauvin, F.; Royer, J.-F. & Déqué, M. 2006. "Response of hurricane type vortices to global warming as simulated by ARPEGE-Climat at high resolution". *Climate Dynamics*, 27(4): 377-399, ISSN: 1432-0894, DOI: [10.1007/s00382-006-0135-7](https://doi.org/10.1007/s00382-006-0135-7)
- Chen, P.; Hoerling, M. P. & Dole, R. M. 2001. "The origin of the subtropical anticyclones". *Journal of Atmospheric Sciences*, 58(13): 1827-1835, ISSN: 1520-0469
- Chiang, J. C. H. & Vimont, D. J. 2004. "Analogous Pacific and Atlantic Meridional Modes of Tropical Atmosphere-Ocean Variability". *Journal of Climate*, 17(21): 4143-4158, ISSN: 0894-8755, DOI: [10.1175/JCLI4953.1](https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1)
- Chu, P. S. 2004. "ENSO and tropical cyclone activity". In: Murnane, R. J.; & Liu, K. (ed), *Hurricanes and typhoons: Past, present, and potential*. New York: Columbia University Press, pp 297-322, ISBN: 978-0231-123388-4.
- Colbert, A. J. & Soden, B. J. 2012. "Climatological Variations in North Atlantic Tropical Cyclone Tracks". *Journal of Climate*, 25(2): 657-673, ISSN: 0894-8755, DOI: [10.1175/JCLI-D-11-00034.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00034.1)
- Elsner, J. B. 2003. "Tracking Hurricanes". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(3): 353-356, ISSN: 1520-0477, DOI: [10.1175/BAMS-84-3-353](https://doi.org/10.1175/BAMS-84-3-353)
- Elsner, J. B.; Liu, K.-B. & Kocher, B. 2000. "Spatial Variations in Major U.S. Hurricane Activity: Statistics and a Physical Mechanism". *Journal of Climate*, 13(13): 2293-2305, ISSN: 0894-8755, DOI: [10.1175/1520-0442\(2000\)013;2293:SVIMUS<2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013;2293:SVIMUS<2.0.CO;2)
- Emanuel, K. A. 2005. "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years". *Nature*, 436(7051): 686-688, ISSN: 1476-4687, DOI: [10.1038/nature03906](https://doi.org/10.1038/nature03906)
- Enfield, D. B.; Mestas-Núñez, A. M. & Trimble, P. J. 2001. "The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.". *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2077-2080, ISSN: 1944-8007, DOI: [10.1029/2000GL012745](https://doi.org/10.1029/2000GL012745)
- Fernández-Alvarez, J. C.; Sorí, R.; Pérez-Alarcón, A.; Nieto, R. & Gimeno, L. 2020. "The Role of Tropical Cyclones on the Total Precipitation in Cuba during the Hurricane season from 1980 to 2016". *Atmosphere*, 11(11): 1156, ISSN: 2169-8996, DOI: [10.3390/atmos11111156](https://doi.org/10.3390/atmos11111156)
- Foltz, G. R.; Balaguru, K. & Hagos, S. 2018. "Interbasin differences in the relationship between SST and Tropical Cyclone Intensification". *Monthly Weather Review*, 146(3): 853-870, ISSN: 1520-0493, DOI: [10.1175/MWR-D-17-0155.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0155.1)
- González-Ramírez, C. M. & Ramos-Guadalupe, L. E. 2019. "Chronology of tropical storms and hurricanes to be affected Havana". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(3): 469-480, ISSN: 2664-0880.
- Gualdi, S.; Scoccimarro, E. & Navarra, A. 2008. "Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model". *Journal of Climate*, 21(20): 5204-5228, ISSN: 0894-8755, DOI: [10.1175/2008JCLI1921.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI1921.1)
- Hurrell, J. W. 1995. "Decadal trends in the north atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation". *Science*, 269(5224): 676-679, ISSN: 1095-9203, DOI: [10.1126/science.269.5224.676](https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676)
- Jones, P. D.; Jonsson, T. & Wheeler, D. 1997. "Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland". *International Journal of Climatology*, 17(13): 1433-1450, ISSN: 1097-0088, DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P)
- Jáuregui, E. 2003. "Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico". *Atmósfera*, 16(4): 193-204, ISSN: 0187-6236.

- Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R. & Joseph, D. 1996. "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472, ISSN: 1520-0477, DOI: [10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kim, T. K. 2015. "T test as a parametric statistic". *Korean J Anesthesiol*, 68(6): 540-546. ISSN: 2005-7563, DOI: [10.4097/kjae.2015.68.6.540](https://doi.org/10.4097/kjae.2015.68.6.540)
- Klotzbach, P. 2011. "El Niño-Southern Oscillation's Impact on Atlantic Basin Hurricanes and U.S. Landfalls". *Journal of Climate*, 24(4): 1252-1263, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/2010JCLI3799.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3799.1)
- Klotzbach, P. & Gray, W. M. 2004. "Updated 6-11-Month Prediction of Atlantic Basin Seasonal Hurricane Activity". *Weather and Forecasting*, 19(5): 917-934, ISSN: 1520-0434
- Knutson, T. R.; Sirutis, J. J.; Garner, S. T.; Vecchi, G. A. & Held, I. M. 2008. "Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions". *Natural Geoscience*, 1(6): 359-364, ISSN: 1752-0908, DOI: [10.1038/ngeo202](https://doi.org/10.1038/ngeo202)
- Kossin, J. P.; Camargo, S. J. & Sitkowski, M. 2010. "Climate Modulation of North Atlantic Hurricane Tracks". *Journal of Climate*, 23(11): 3057-3076, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/2010JCLI3497.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3497.1)
- Kossin, J. P.; Olander, T. L. & Knapp, K. R. 2013. "Trend Analysis with a New Global Record of Tropical Cyclone Intensity". *Journal of Climate*, 26(24): 9960-9976, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/JCLI-D-13-00262.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00262.1)
- Landsea, C. W. & Franklin, J. L. 2013. "Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format". *Monthly Weather Review*, 141(10): 3576-3592, ISSN: 1520-0493, DOI: [10.1175/MWR-D-12-00254.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1)
- Landsea, C. W. Harper, B. A.; Hoarau, K.; & Knaff, J. A. 2006. "Can We Detect Trends in Extreme Tropical Cyclones?" *Science*, 313(5786), 452-454, ISSN: 1095-9203, DOI: [10.1126/science.1128448](https://doi.org/10.1126/science.1128448)
- Larson, J.; Zhou, Y. & Higgins, R. W. 2003. "Characteristics of Landfalling Tropical Cyclones in the United States and Mexico: Climatology and Interannual Variability". *Journal of Climate*, 18(8), 1247-1262, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/JCLI3317.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3317.1)
- Li, W. ; Li, L. ; Fu, R. ; Deng, Y. & Wang, H. 2011. "Changes to the North Atlantic Subtropical High and Its Role in the Intensification of Summer Rainfall Variability in the Southeastern United States". *Journal of Climate*, 24(5): 1499-1506, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/2010JCLI3829.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3829.1)
- MacQueen, J. 1967. "Others some methods for classification and analysis of multivariate observations". In: Le-Cam, L.; & Neyman, J (ed), *The Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 1, No 14, Berkeley and Los Angeles: University of California Press, pp. 281-297.
- Marcelo, G.; Rodríguez, A.; Hernández, J. F. & González, C. M. 2019. "Caracterización de los huracanes que han afectado las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque". In: *Memoria X Congreso Cubano de Meteorología*. La Habana: Sociedad Meteorológica de Cuba. ISBN: 978-959-7167-64-8 [Consulted: 14 diciembre, 2021]
- Marcelo, G. C. G. & Rodríguez, A. A. 2020. "Characterization of North Atlantic hurricanes that have affected the provinces of Artemisa, Havana and Mayabeque between 1791 and 2018". *Revista Cubana de Meteorología*, 26(3): 1-7, ISSN: 2664-0880.
- Marcelo-García, G. C. & Roura-Pérez, P. 2020. "Statistical climatological study of tropical storm in the provinces of Artemisa, Havana and Mayabeque, return periods of tropical cyclones". *Revista Cubana de Meteorología*, 26(sp): 1-8, ISSN: 2664-0880.
- McDonald, R. E.; Bleaken, D. G.; Cresswell, D. R.; Pope, V. D. & Senior, C. A. 2005. "Tropical storms: Representation and diagnosis in climate models and the impacts of climate change". *Climate Dynamics*, 25(1): 19-36, ISSN: 1432-0894, DOI: [10.1007/s00382-004-0491-0](https://doi.org/10.1007/s00382-004-0491-0)
- Murakami, H. & Wang, B. 2010. "Future Change of North Atlantic Tropical Cyclone Tracks: Projection by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model". *Journal of Climate*, 23(10): 2699-2721, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/2010JCLI3338.114](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3338.114)
- Murray, R. & Simmonds, I. 1991. "A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data". *Australian Meteorological Magazine*, 30(2): 155-166, ISSN: 0004-9743.
- Oouchi, K.; Yoshimura, J.; Yoshimura, H.; Mizuta, R.; Kusunoki, S. & Noda, A. 2006. "Tropical cyclone climatology in a global warming climate as simulated in a 20-km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses". *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84(2): 259-276, ISSN: 2186-9057, DOI: [10.2151/jmsj.84.259](https://doi.org/10.2151/jmsj.84.259)
- Parzen, E. 1962. "On Estimation of a Probability Density Function and Mode". *The Annals of Mathematical Statistics*, 33(3): 1065-1076, ISSN: 0003-4851, DOI: [10.1214/aoms/1177704472](https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472)
- Phadke, A. C.; Martino, C. D.; Cheung, K. F. & Houston, S. H. 2003. "Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *Ocean Engineering*", 30(4): 553-578, ISSN: 298018, DOI: [10.1016/S0029-8018\(02\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00033-1)

- Pérez-Alarcón, A.; Fernández-Alvarez, J. C.; Sorí, R.; Nieto, R. & Gimeno, L. 2021. "The Combined Effects of SST and the North Atlantic Subtropical High-Pressure System on the Atlantic Basin Tropical Cyclone Interannual Variability". *Atmosphere*, 12(3): 329, ISSN: 2073-4433, DOI: [10.3390/atmos12030329](https://doi.org/10.3390/atmos12030329)
- Reboita, M. S.; Ambrizzi, T.; Silva, B. A.; Pinheiro, R. F.; & da Rocha, R. P. 2019. "The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate". *Frontiers in Earth Science*, 7: 8, ISSN: 22966463, DOI: [10.3389/feart.2019.00008](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008)
- Rosenblatt, M. 1956. "Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function". *The Annals of Mathematical Statistics*, 27(3): 832-837, ISSN: 0003-4851, DOI: [10.1214/aoms/1177728190](https://doi.org/10.1214/aoms/1177728190)
- Roura-Pérez, P.; Sistachs-Vega, V.; Vega, R. & Alpizar-Tirzo, M. 2018. "Climatic Statical characterization of hurricanes in Cuba during the period 1791-2016". *Revista Cubana de Meteorología*, 24(3): 304-312, ISSN: 2664-0880.
- Shieh, O. & Colucci, S. J. 2010. "Local Minimum of Tropical Cyclogenesis in the Eastern Caribbean". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(2), 185-196, ISSN: 1520-0477.
- Simpson, R. H. & Saffir, H. 1974. "The hurricane disaster potential scale". *Weatherwise*, 27(8): 169, ISSN: 1940-1310.
- Smith, C. A. & Sardeshmukh, P. D. 2000. "The effect of ENSO on the intraseasonal variance of surface temperatures in winter". *International Journal of Climatology*, 20(13): 1543-1557, ISSN: 1097-0088, DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20001115\)20:13<1543::AID-JOC579>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1543::AID-JOC579>3.0.CO;2-A)
- Valderá, N. F.; González, P. C. & Pérez, S. R. 2021. "Variabilidad de la actividad ciclónica tropical en el océano Atlántico, golfo de México, mar Caribe y Cuba". In: Hernández, D., Rodríguez, Y., Gutiérrez, T. & Paz, L. (Eds.), XIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo 2021, VII Congreso sobre Cambio Climático, La Habana: Instituto de Meteorología, pp. 240-253, ISBN: 978-959-300-210-3, Available: <<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1bqucOmBWP3NiVyDp0bbRIP7sF93VfpR6>>, [Consulted: 7 Diciembre, 2021]
- Vecchi, G. A. & Knutson, T. R. 2011. "Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878-1965) Using Ship Track Density". *Journal of Climate*, 24(6): 1736-1746, ISSN: 1520-0442, DOI: [10.1175/2010JCLI3810.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1)
- Wahiduzzaman, M. & Yeasmin, A. 2020. "A kernel density estimation approach of North Indian Ocean tropical cyclone formation and the association with convective available potential energy and equivalent potential temperature". *Meteorology and Atmospheric Physics*, 132(3): 603-612, ISSN: 1436-5065, DOI: [10.1007/s00703-019-00711-7](https://doi.org/10.1007/s00703-019-00711-7)
- Wang, C. 2007. "Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate". *Climate Dynamics*, 29(4): 411-422, ISSN: 1432-0894, DOI: [10.1007/s00382-007-0243-z](https://doi.org/10.1007/s00382-007-0243-z)
- Wang, C.; Lee, S.-K. & Enfield, D. B. 2008. "Atlantic Warm Pool acting as a link between Atlantic Multidecadal Oscillation and Atlantic tropical cyclone activity". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5): Q05V03, ISSN: 1525-2027, DOI: [10.1029/2007GC001809](https://doi.org/10.1029/2007GC001809)
- Wang, C.; Wang, X.; Weisberg, R. H. & Black, M. L. 2017. "Variability of tropical cyclone rapid intensification in the North Atlantic and its relationship with climate variations". *Climate Dynamics*, 49(11): 3627-3645, ISSN: 1432-0894, DOI: [10.1007/s00382-017-3537-9](https://doi.org/10.1007/s00382-017-3537-9)
- Webster, P. J.; Holland, G. J.; Curry, J. A. & Chang, H. R. 2005. "Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment". *Science*, 309(5742): 1844-1846, ISSN: 1095-9203, DOI: [10.1126/science.1116448](https://doi.org/10.1126/science.1116448)
- Xie, L.; Yan, T.; Pietrafesa, L. J.; Morrison, J. M. & Karl, T. 2005. "Climatology and Interannual Variability of North Atlantic Hurricane Tracks". *Journal of Climate*, 18(24): 5370-5381, ISSN: 0894-8755, DOI: [10.1175/JCLI3560.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3560.1)

Patricia Coll-Hidalgo Departamento de Meteorología, Empresa Cubana de Navegación Aérea, La Habana, Cuba.  
Albenis Pérez-Alarcón Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, Environmental Physics Laboratory (EPhysLab), Campus As Lagoas s/n, Ourense, 32004, Spain. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

**Contribución de los autores:** P.C-H concibió la idea inicial de la investigación. Ambos autores participaron en el procesamiento de los datos, en la redacción del artículo y en el diseño de las figuras.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)